

# УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ: ОШИБКИ, ШУМЫ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Ф. Коти, Ч. Ерейдес

Национальная организация аэрокосмических исследований (ONERA), F92322 Шатийон, Франция

В ONERA в течение многих лет для измерения скорости горения используется ультразвуковая техника. В статье представлены данные, полученные для смесевых топлив при различных давлениях и начальных температурах, которые позволяют обсуждать преимущества и ограничения метода с точки зрения возможности и точности измерения. Проиллюстрирована чувствительность процесса распространения звуковых волн к соответствующим физическим характеристикам и внешним условиям. Показаны ошибки, обусловленные неадекватными корректирующими членами, принятыми в теории измерений, а также влиянием электронных шумов аппаратуры и процедуры дифференцирования экспериментальных данных. Выбор подходящих рабочих условий позволяет снизить инструментальную ошибку определения скорости горения до 1 %. Даже если ультразвуковой метод не является универсальным и идеальным, качество полученных данных достаточно высокое, чтобы обратить на него внимание.

## ВВЕДЕНИЕ

Для проектирования реактивных двигателей требуется точное определение квазистационарной скорости горения твердых топлив. Получение данных с ошибкой менее 1 % — это желаемый результат для любых измерительных методов. Сами методы должны быть бесконтактными [1], т. е. измерительная процедура не должна оказывать влияния на процесс горения.

Ультразвуковая техника измерения скорости горения используется в ONERA в течение многих лет. Цель данной статьи провести анализ точности этого бесконтактного метода. Кратко изложена теория ультразвукового метода измерений. Результаты экспериментов с несколькими смесевыми топливами демонстрируют роль основных параметров, влияющих на точность определения скорости горения. Акустическое поле и детектирование отражения от горячей поверхности могут приводить к потере точности метода. Физические характеристики, а именно: температура (начальное значение и температурный профиль) и давление (порождающее поле напряжений) — влияют на скорость распространения и затухание упругой волны.

В конце статьи рассмотрены ошибки, обусловленные электронными шумами и погрешностями вычислений. Обсуждаются достоинства и недостатки ультразвукового метода с точки зрения точности измерений и пределов применимости.

## 1. ПРИНЦИП МЕТОДА

Принцип ультразвукового метода типичен для классической неразрушающей техники излучения/приема. Ультразвуковой датчик излучает упругую волну, которая проходит сквозь образец. Она отражается от горячей поверхности и возвращается назад к преобразователю. Специальное электронное устройство позволяет проследить смещение отраженного от горячей поверхности сигнала по сравнению с его начальным положением, вплоть до момента полного выгорания топлива (рис. 1). Обычно датчик не контактирует с исследуемым энергетическим материалом. Между ними вставляется соединительный материал — жесткая резина, благодаря чему можно проводить измерения вплоть до полного сгорания образца. При этом датчик изолирован от условий внутри камеры. Соединительный материал должен быть акустически адаптирован к энергетическому материалу по акустическому импедансу ( $\rho C$ ), с тем чтобы уменьшить амплитуду промежуточного эхо-сигнала от поверхности контакта образца и соединительного материала (здесь  $\rho$  — плотность,  $C$  — скорость распространения продольной волны).

Время распространения ультразвуковой волны связано с толщинами измеряемых материалов и со скоростями упругой волны в них. Если скорость волны постоянна, время прохождения прямо пропорционально толщине образца ( $W$ ):  $\tau = 2W/C$ . Скорость волны за-

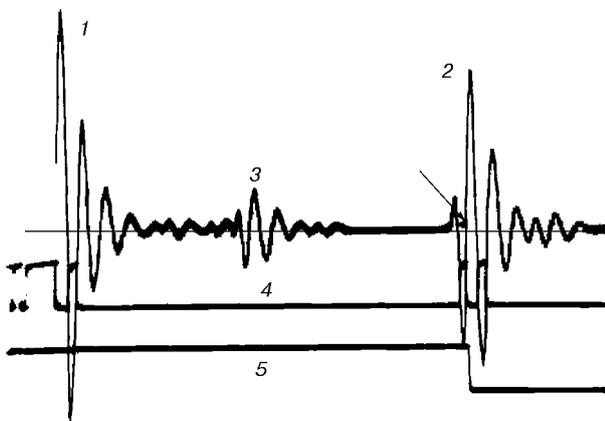


Рис. 1. Осциллограмма сигнала временной задержки отражений ультразвука для твердого топлива и соединительного материала: 1 — излучаемый импульс, 2 — отражение от поверхности, 3 — отражение от контактной границы, 4 — сигнал порогового детектора, 5 — сигнал, пропорциональный времени распространения; стрелкой указана точка регистрации — пересечение с нулем

висит от температуры (как начального значения, так и пространственного распределения), поля напряжений, обусловленного внутренним давлением, и геометрии образца и оболочки. Исследования ONERA устанавливают соотношения между физическими характеристиками и временем распространения упругой волны [2–4]. Наилучшее выражение для скорости волны имеет вид

$$\frac{C_{ref}}{C} = (1 + k_T(T - T_{ref}))(1 - k_p(p - p_{ref})), \quad (1)$$

где  $p$  — давление, МПа;  $k$  — коэффициент изменения волновой скорости для твердого топлива ( $\text{МПа}^{-1}$  или  $\text{K}^{-1}$ ); индексы  $ref$ ,  $T$  и  $p$  относятся к базовым условиям, температуре и давлению соответственно. Скорость горения ( $r_b$ ) и толщина горящего свода ( $W_b$ ) связаны с измеряемыми величинами: изменением времени распространения волны ( $\Delta\tau$ ), давлением ( $p$ ) и их производными ( $d\Delta\tau/dt$  и  $dp/dt$ ) — соотношениями

$$r_b = \frac{C_{pr,ref}}{2(1 - k_p(p - p_{ref}))} \left\{ \frac{d\Delta\tau}{dt} - \left[ k_p \left( \frac{2W_{pr,in}}{C_{pr,ref}} - \Delta\tau + \frac{2W_{clp}(p - p_{ref})}{C_{c,ref}} \right) / \left( (1 - k_p(p - p_{ref})) + \frac{2W_{clp}}{C_{c,ref}} \right) \frac{dp}{dt} \right] \right\}, \quad (2)$$

$$W_b = \frac{C_{pr,ref}}{2(1 - k_p(p - p_{ref}))} \times \left( \frac{2W_{pr,in}}{C_{pr,ref}} + \frac{2W_{clp}(p - p_{ref})}{C_{c,ref}} - \Delta\tau \right) - \frac{k_T(T_s - T_{ref})a}{r_b}. \quad (3)$$

Здесь  $l_p$  — коэффициент скорости волны в соединительном материале;  $a$  — коэффициент температуропроводности; индексы  $c$  и  $pr$  использованы для соединительного материала и топлива,  $in$  — для начальных условий,  $s$  — для горячей поверхности. Последний член уравнения (3) соответствует аппроксимации первого порядка вклада теплового профиля установившегося горения топлива в изменение времени распространения.

Влияние температуры и давления более существенно в нестационарных условиях, т. е. при временных изменениях давления и теплового потока. Можно выделить два типа зависимостей от уровня скорости горения. Граница между ними лежит примерно при скорости 1 мм/с. Для материалов с низкой скоростью горения (таких, как тепловой изолирующий материал или связка — полибутadiен с гидроксильными концевыми группами, используемых в гибридных реактивных двигателях), при том что давление всегда оказывает влияние, главным фактором становится изменение теплового профиля. Время прохождения отражения ультразвуковой волны меняется в зависимости от количества тепла, аккумулированного материалом. При увеличении температуры скорость волны значительно уменьшается, вызывая увеличение времени распространения [4]. В этом случае соотношение (2) неверно. Данная статья посвящена исследованию свойств смесового твердого топлива. Температурный профиль не оказывает существенного влияния на толщину выгоревшего слоя и скорость горения. Считается, что тепловой профиль быстро устанавливается после зажигания и квазистационарен даже при изменении давления. Главным параметром, влияющим на результат, является давление, особенно его градиент  $dp/dt$  [3, 5, 6]. Это заставляет учитывать конкретные условия эксперимента при вычислении скорости горения.



Рис. 2. Ультразвуковой датчик

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В настоящее время ультразвуковой метод широко используется во Франции [2, 7], Нидерландах [8, 9], США [10–14] и Индии [15, 16]. Основным приложением метода является определение классической зависимости скорости горения от давления. Чтобы получить закон  $r_b = ap^n$ , используется простая установка (рис. 2) с зарядом торцевого горения и аблирующим соплом, применение которого вызывает изменение давления во время эксперимента. Имеется несколько типов установок: малые ракетные двигатели и бомба постоянного объема. Чтобы минимизировать отражение от границы контакта, соединительный материал должен быть подобран в соответствии с акустическим импедансом топлива. Необходимо также определить чувствительность скорости распространения ультразвуковой волны в материале в зависимости от физических характеристик, чтобы использовать ее в программе обработки данных. Исследователи, однажды используя этот способ, находят его более точным и привлекательным по сравнению с широко используемыми методами [2, 3].

Твердотопливные двигатели могут подвергаться тепловому воздействию в широком диапазоне температур: жар пустыни, уровень моря или большая высота полета. Таким образом, температурная чувствительность скорости горения является важным параметром, который должны знать и конструктор ракеты, и изготовитель топлива. Ультразвуковой метод позволяет провести подобные измерения (от  $-50$  до  $+80$  °C), однако нужно разрешить

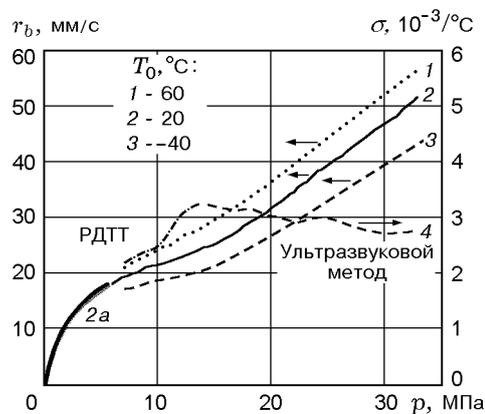


Рис. 3. Скорость горения смешанного топлива при различных начальных температурах:

эксперименты в бомбе постоянного объема; 1–3 — сглаженные данные,  $V = 1,2$  л; 2a — несглаженные данные,  $V = 7$  л

множество проблем, чтобы получить данные с необходимой точностью. В подборе соединительного материала не существует единого решения для всего диапазона температур. Механические свойства, качество соединения и коэффициенты объемного расширения оказывают значительное влияние на измерения как при низких, так и при высоких температурах. Огневые испытания в малой бомбе постоянного объема с регулируемой температурой, где давление повышается за счет газов, образующихся при горении, позволяют получить значения скорости в очень широком интервале давлений. Чем меньше внутренний объем бомбы, тем тоньше образец и больше значение  $dp/dt$ . Это ведет к большему разбросу данных, преимущественно за счет электронной аппаратуры. Временные зависимости, полученные в этих экспериментах, следует рассматривать как предварительные, которые необходимо уточнять, используя бомбу большего объема (и меньшего уровня  $dp/dt$ ). Зависимости скорости горения от давления, представленные на рис. 3, иллюстрируют этот подход. Температурная чувствительность получена из трех сглаженных кривых и сравнивается со значениями, определенными в стандартных классических испытаниях ракетных двигателей. Этот пример подчеркивает потенциальные возможности ультразвукового метода. Однако цель состоит в том, чтобы продемонстрировать влияние различных параметров на точность метода, а не точность данной методики в сравнении с техникой измерения полного времени сгорания при постоянном давлении или с какой-либо другой.

### 3. ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 3.1. Ультразвуковое поле и точки детектирования

Акустическое поле, создаваемое ультразвуковым датчиком, состоит из двух зон: ближнее поле и дальнее [17, 18]. Ближнее поле — это область непосредственно вблизи излучателя, где акустическое давление образует серию максимумов и минимумов. Эта зона заканчивается на расстоянии  $N = D^2 f / 4C$  от излучателя и зависит от скорости звука в материале ( $C$ ), частоты ( $f$ ) и диаметра излучателя ( $D$ ). В области дальнего поля акустическое давление, т. е. амплитуда отражений, медленно убывает с расстоянием вплоть до нуля. В связи с колебаниями давления в ближнем поле ультразвуковые измерения должны проводиться в области дальнего поля. Все преобразователи излучают расширяющийся луч. Угол расширения  $\alpha$  зависит от тех же параметров, что и протяженность ближнего поля:  $\sin(\alpha/2) = 0,514 C / fD$ , вплоть до расстояния, где амплитуда волны уменьшается на 6 дБ. Значение  $\alpha$  определяет размер поверхности, от которой отражаются волны. Акустическое поле зависит от акустической частоты (или длины волны). Поскольку все датчики имеют широкую полосу частот, структура ближнего поля и расширение луча значительно варьируются.

Так следует из теории. Однако сильное затухание в твердом топливе, обусловленное внутренним рассеиванием, оказывает сильное влияние на характеристики акустического поля. Для классического смесового топлива скорость продольной волны при комнатной температуре находится в диапазоне  $1800 \div 2000$  м/с. При толщине образца 20 мм время распространения волны  $\tau \approx 20$  мкс. Затухание в данном случае много сильнее, чем для стали или других классических материалов, и это ограничивает максимальную толщину топлива, на которой могут быть проведены измерения, значениями  $100 \div 150$  мм в зависимости от типа топлива. Этот предел может быть расширен [14]. Топливо выступает в качестве низкочастотного фильтра, акустический луч фокусируется благодаря внутреннему рассеиванию. Поверхность горения, вносящая вклад в регистрируемое эхо-отражение, составляет приблизительно треть диаметра излучателя.

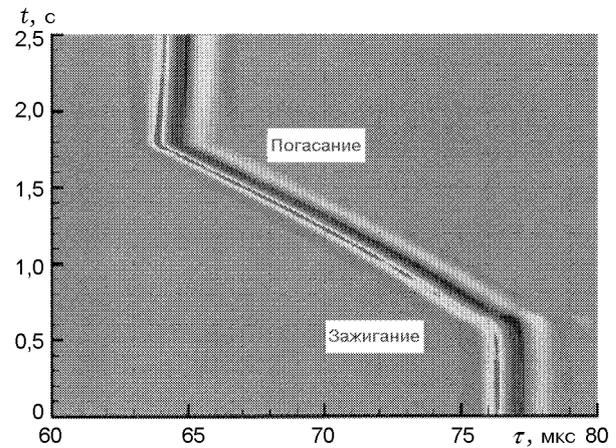


Рис. 4. Диаграмма амплитуд отраженных ультразвуковых сигналов

Отраженные сигналы, соответствующие расстоянию до поверхности топлива и представленные на рис. 1 справа, состоят из нескольких положительных и отрицательных пиков. На рис. 4 эти сигналы расположены (для негорящего заряда) в интервале времени распространения сигнала  $\tau = 75 \div 79$  мкс. При  $t = 0,5$  с образец топлива воспламеняется и загорается: время распространения отраженного от поверхности сигнала уменьшается. В момент времени  $t \approx 1,8$  с происходит погасание, чему и соответствуют отраженные сигналы в интервале  $\tau = 63 \div 66$  мкс. Затем соединительный материал нагревается газообразными продуктами горения, что несколько увеличивает время распространения. Во время горения амплитуда сигнала, отраженного от поверхности горения, возрастает по мере уменьшения толщины горящего слоя. Изменение амплитуды сигнала видно на рис. 5, где приведены спектральные диаграммы ультразвуковых сигналов отражения, полученных в ходе эксперимента по горению. Значительное возрастание амплитуды наблюдается после  $t = 2$  с. Из-за своих упругих и акустических свойств слой топлива выступает в роли низкочастотного фильтра. В связи с этим диапазон частот максимального уровня сигнала, расположенный в приведенном примере в области частоты упругих колебаний 900 кГц, смещается в направлении высоких частот в конце горения заряда.

Изменение времени распространения сигнала, соответствующее сгоревшей части свода, получено путем измерения смещения времени пересечения нулевого уровня главным (положительным или отрицательным) фронтом от-

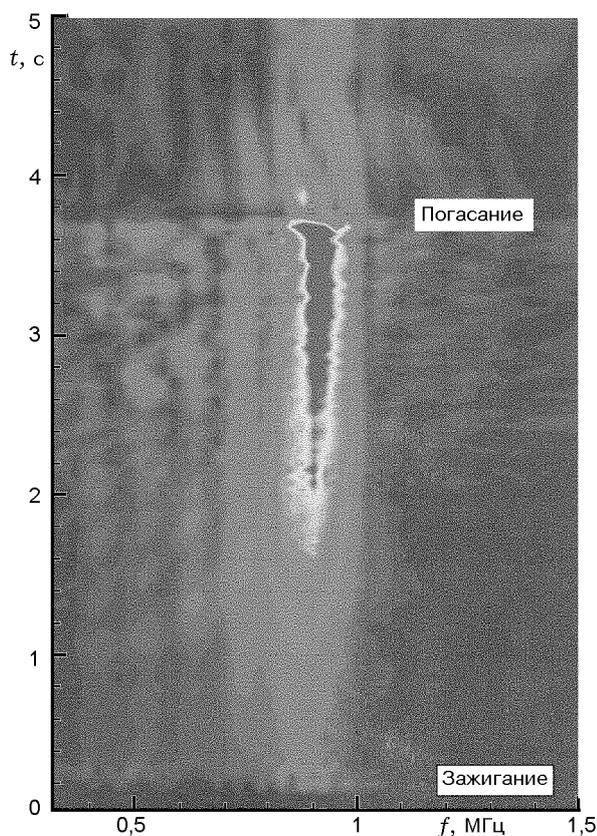


Рис. 5. Диаграмма спектра отраженных ультразвуковых сигналов

раженного сигнала. Эта точка менее чувствительна к изменениям амплитуды (по сравнению с первичным пиком отраженного сигнала), однако спектральные изменения в сигнале частично влияют на ее положение [4, 5]. В ультразвуковом приборе, разработанном ONERA, смещение этой точки преобразуется в аналоговое выходное напряжение. Ошибку, вызванную изменением амплитуды отраженной акустической волны с изменением толщины горящего слоя, можно уменьшить, используя для регистрации ультразвукового сигнала подходящие низкочастотные фильтры и поддерживая, насколько это возможно, амплитуду отраженного сигнала постоянной. К тому же эта ошибка является величиной второго порядка по сравнению с ошибкой, обусловленной физическими свойствами, влияющими на время распространения.

### 3.2. Физические величины

**3.2.1. Корректирующие поправки.** Представленные на рис. 3 результаты ультразвуковых

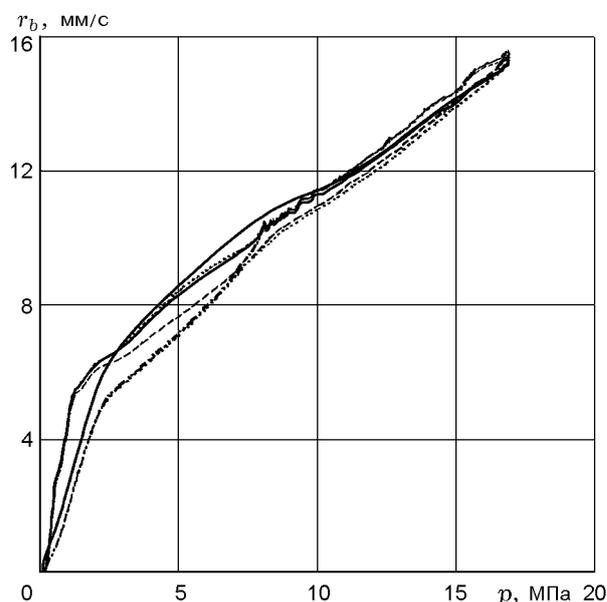


Рис. 6. Влияние коэффициентов чувствительности к давлению скорости распространения звука в топливе на данные по скорости горения (заряд с переменной площадью горения):

сплошные линии —  $k_p = 2,3 \cdot 10^{-3}$  1/МПа,  $l_p = 5 \cdot 10^{-4}$  1/МПа,  $C_{p,ref} = 1938$  м/с,  $C_{c,ref} = 2585$  м/с; пунктирные —  $k_p = 3 \cdot 10^{-3}$  1/МПа,  $l_p = 5 \cdot 10^{-4}$  1/МПа,  $C_{p,ref} = 1938$  м/с,  $C_{c,ref} = 2585$  м/с; штриховые —  $k_p = 3,5 \cdot 10^{-3}$  1/МПа,  $C_{p,ref} = 1954$  м/с

экспериментов получены в бомбе постоянного объема. Качество измерений зависит от внутреннего объема. При проведении экспериментов в бомбе большого объема не требуется дополнительного сглаживания данных (область низких давлений на рис. 3). Темп роста давлений в бомбе малого объема (1,2 л) в процессе горения увеличивается от 50 до 150 МПа/с. В экспериментах с использованием 7-литровой бомбы всегда  $dp/dt < 5$  МПа/с. Корректирующая добавка в уравнении скорости горения (2) умножается на  $dp/dt$ . Таким образом, чем ниже градиент, тем выше должна быть точность измерения. Величина  $dp/dt$  связана с условиями проведения эксперимента, и именно она в конечном счете ответственна за точность метода.

На результат влияют и такие поправки, как чувствительность к давлению скорости распространения упругой волны. Следующий пример иллюстрирует алгоритм, используемый в ONERA (рис. 6). Данные рисунка со-

ответствует горению с одного конца бронированного конического заряда. Кривые скорости горения получены для различных величин чувствительности топлива к давлению (три значения) и с учетом влияния соединительного материала, а именно, с учетом его вклада во время распространения сигнала, и без учета. Общим критерием для этих кривых является то, что толщина сгоревшего свода равна начальной длине образца топлива. Согласование достигнуто подбором значения скорости волны в топливе (1938 м/с). В случае, когда соединительный материал рассматривается как не влияющий на время распространения, для согласования необходимо увеличить влияние давления на скорость распространения волны в твердом топливе (т. е. использовать наибольшее значение  $k_p$ ). В экспериментах, результаты которых представлены на рис. 6, давление вначале растет, а затем убывает. В зависимости от значений коэффициентов скорость горения различна при одном и том же уровне давления (например, при  $p = 5$  МПа), т. е. для данного набора коэффициентов кривая скорости горения при нарастающем давлении не совпадает со скоростью горения при спаде давления. В конечном счете удастся добиться почти одинакового уровня скоростей горения, используя подходящий набор ультразвуковых параметров. Поэтому очень важно определять коэффициенты чувствительности к давлению скорости упругой волны в топливе и подобранном к нему соединительном материале. Это требует предварительных калибровочных тестов с использованием накачки бомбы холодным газом ( $N_2$ ) [5].

**3.2.2. Начальная толщина и волновая скорость.** Ультразвуковой метод основан на измерении времени распространения волны. При этом точность метода связана с правильностью измерения начальной толщины заряда. Скорость волны в топливе определяется измерением времени ее распространения сквозь заряд. Начальную толщину отвержденного топливного заряда легко измерить с хорошей точностью ( $\pm 0,2$  мм или менее). Совпадение результатов достигается, когда выбранная скорость волны одинакова для всех выполненных экспериментов (рис. 7).

Определение скорости горения неотвержденного топлива значительно сложнее. Начальная толщина заряда определяется исходя из массы залитой пасты и геометрии обоймы, с использованием теоретической плотности. Ал-

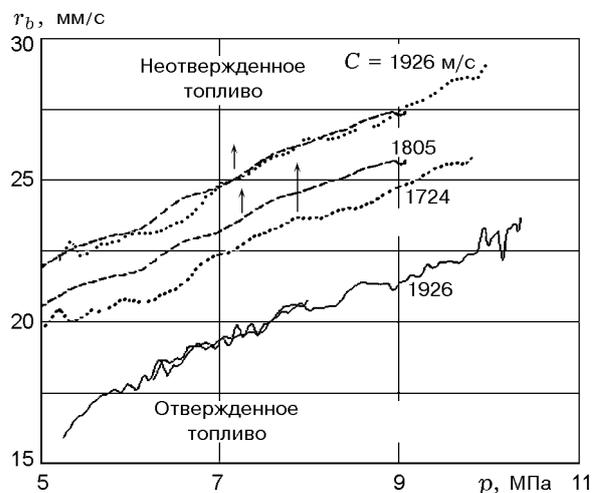


Рис. 7. Сопоставление результатов измерения волновой скорости в неотвержденном и отвержденном топливах

горитм такого рода экспериментов описан в работе [19]. Волновые скорости, определенные из «теоретической» начальной толщины в двух экспериментах, не совпадают, и их значения ниже, чем для конечного отвержденного топлива (см. рис. 7). С учетом волновой скорости в отвержденном топливе скорость горения возрастает до обычного (более высокого) уровня. Отсюда следует, что неотвержденные образцы должны быть длиннее, чем ожидалось из соотношения для волновых скоростей. Данные рис. 7 показывают, что паста горит на 25 % быстрее, чем отвержденное топливо. Для проверки этой гипотезы толщина заряда измерялась непосредственно перед опытом, после подготовительной фазы. Она оказалась действительно больше «теоретического» значения, а на поверхности образца были обнаружены пузырьки. Это объясняет разницу начальных толщин в обоих экспериментах и отличие их от «теоретического» значения. Существует неопределенность в величине скорости горения выбранного неотвержденного топлива. Это означает, что методика предварительных испытаний (на пастообразных образцах) недостаточно хороша для получения представительного образца данной мешки топливной смеси, не содержащего пузырьков, который мог бы соответствовать данному составу топлива и вязкости его пасты. К счастью, эта работа, проделанная несколько лет назад на твердом топливе для твердо-топливного двигателя «Ариан 5», дала превосходные результаты [19].

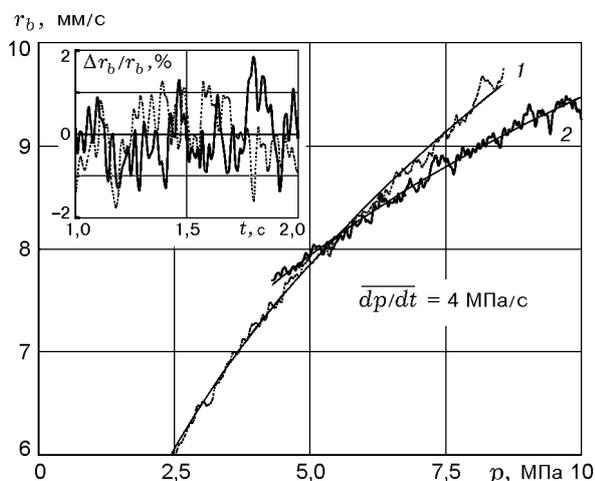


Рис. 8. Данные ультразвуковых измерений: бомба постоянного объема,  $V = 7$  л; вставка — ошибка относительно осредненной кривой; 1 — неотверженное топливо,  $r_b = 4,2948 p^{0,3744}$  ( $R^2 = 0,9976$ ), 2 — отверженное топливо,  $r_b = 5,2734 p^{0,2542}$  ( $R^2 = 0,9839$ )

### 3.3. Неакустические характеристики

**3.3.1. Шумы электронных устройств.** В зависимости от условий работы, отношение сигнал/шум выходного сигнала электронного устройства влияет на погрешность определения скорости горения. На рис. 8 представлены результаты экспериментов, проведенных в бомбе постоянного объема (7 л). Количество данных достаточно велико для вычисления скорости горения с использованием большого временного окна (401 измерение на окно) при небольших изменениях давления. Разброс данных определялся вычислением отклонения скорости горения от среднего значения, соответствующего закону  $r_b = ap^n$ . Разброс лежит в пределах  $\pm 1\%$ , что достаточно хорошо, но возможно получение лучшего результата за счет увеличения частоты отсчетов и использования бомбы большего объема (т. е. при более низком значении  $dp/dt$ ).

В экспериментах, проводимых при наименьшем внутреннем объеме (см. рис. 3) с той же частотой измерений, скорость горения вычисляется из меньшего числа данных (21 или 51) на временное окно. Разброс увеличивается, становясь более  $\pm 5\%$ , однако анализ относительной ошибки выявляет влияние частоты электросети (50 Гц). Таким образом, здесь разброс обусловлен, в основном, электронной

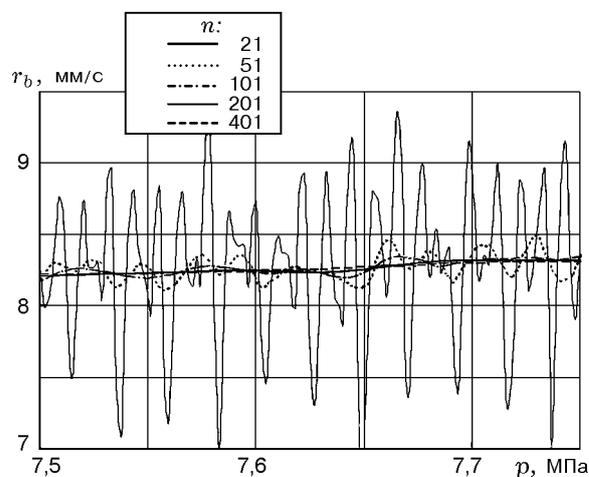


Рис. 9. Вычислительный шум: влияние числа точек на определение скорости горения:  $n$  — число точек временного окна; частота дискретизации 5000 Гц

аппаратурой. В этом случае эффективно проводить сглаживание экспериментальных данных.

**3.3.2. Вычисление производной функции.** Определение любой производной функции всегда не просто. Используемая в ONERA процедура основана на выборе числа точек во временном окне. Проводится среднеквадратичная аппроксимация: величина в середине временного окна принимается за толщину выгоревшего свода, а значение производной функции в той же точке рассматривается как скорость горения. Можно рассчитать скорость горения иным способом — из нескольких последовательно осредненных по временному окну значений толщин свода. Качество аппроксимации связано с числом анализируемых точек  $m$ . Разброс сильно зависит от числа измерений, по которым проводится осреднение, на одно значение скорости горения (рис. 9). Не так просто определить значение скорости горения, если ее колебания обусловлены влиянием вычислительных процедур либо физических явлений. Можно надеяться, что явление физической нестационарности горения обычно не зависит от расчетных эффектов [2, 20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ультразвуковой метод, применяемый для исследования горения твердого топлива, становится конкурентоспособным научным и про-

мышленным инструментом, используемым как для контроля баллистических свойств, так и для изучения новых составов твердого топлива. С его помощью можно регистрировать эволюцию скорости горения в локальной области заряда: с хорошей точностью изучается процесс эрозионного горения, а для крупногабаритных двигателей диагностируется такое явление, как изменение скорости горения по мере выгорания топлива вследствие технологических особенностей изготовления двигателя.

Площадь поверхности горения, от которой отражается упругая волна, имеет конечный размер, зависящий от степени затухания в веществе, диаметра излучателя и геометрии заряда. Скорость горения, получаемая ультразвуковым методом, является величиной, осредненной по небольшой площади. Однако очень мелкомасштабные или изолированные процессы, обусловленные механизмом горения, не могут быть обнаружены ультразвуковым методом, если не применять очень маленький датчик. Поскольку ультразвуковой метод действует как калориметр (волновая скорость меняется при прохождении теплового слоя), можно исследовать стадии инертного прогрева и зажигания, если известны теплофизические характеристики материала. Что касается крупногабаритных двигателей, то очень трудно измерить выгорание заряда при большой суммарной толщине топлива, хотя некоторые интересные результаты были получены [14]. Измерение времени распространения ультразвука сквозь несколько десятков сантиметров твердого топлива требует специальных условий. Частота повтора излучаемых ультразвуковых импульсов должна быть уменьшена, поскольку начальная толщина заряда возрастает: реже проводится измерение данных и меньше становится точность вычисления скорости.

Что касается точности метода, было показано, что можно различить два твердых топлива с разницей в скоростях горения лишь 0,15 мм/с при уровне  $r_b = 7,5$  мм/с. Это различие находится на уровне шума (2 %). Неопределенность или ошибка определения коэффициента температурной чувствительности скорости горения ( $\sigma_p$ ) много меньше, чем в опытах с бомбой постоянного давления. Оценим ее приближенно как  $\Delta\sigma_p = 2(\Delta r_b/r_b)/\Delta T$ . Тогда при экспериментальной ошибке определения скорости горения меньше 2 % она равна  $0,04 \cdot 10^{-2}$  1/°C для интервала начальных

температур  $-40 \div +60$  °C. Ошибка температурной чувствительности составляет  $\approx 10$  % для  $\sigma_p = 0,3 \cdot 10^{-2}$  1/°C (см. рис. 3).

Задача измерения скорости горения с точностью 1 % не так уж далека от разрешения. Путем выбора соответствующих условий измерения (т. е. оборудования, толщины заряда, частоты повторений и длительности временного окна) цель может быть достигнута.

Суммируя изложенное, можно сказать, что во Франции ультразвуковой метод в применении к твердым топливам становится промышленным диагностическим инструментом. Существуют возможности использования этого метода для крупногабаритных ракетных двигателей и для более широких теоретических исследований процессов горения. Метод также перспективен для изучения поведения теплозащиты, горения гибридных топлив и других энергетических материалов. В этих случаях ультразвуковое зондирование должно дополняться численным моделированием теплопередачи. Точность метода превосходна по сравнению с другими неразрушающими измерениями или классическими методами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Cauty F.** Non-intrusive measurement methods applied to energetic material regression rate determination // Propellants, Explosives, Rockets, and Guns: Proc. of the Second Intern. High Energy Materials Conference and Exhibit, IIT Madras, Chennai, India, 8–10 December, 1998. P. 3–17.
2. **Cauty F. and Traineau J. C.** Mesure par ultrasons de la vitesse de combustion d'un propergol solide: perfectionnement et applications a divers regimes de fonctionnement // Proc. of the 19th Intern. Congress of ICT. Karlsruhe, Germany, 1988.
3. **Cauty F., Démarais J. C., and Éradès C.** Determination of solid propellant burning rate sensitivity to the initial temperature by the ultrasonic method // Non-Intrusive Combustion Diagnostics / K. K. Kuo and T. P. Parr (Eds). New York: Begell House, 1994. P. 642–653.
4. **Cauty F., Démarais J. C., Éradès C., Caugant C.** Internal insulation and solid propellant behavior measured by ultrasonic method on solid rocket motors // AIAA Paper N 97-2994. 1997.
5. **Cauty F.** Mesure par ultrasons de la vitesse de combustion des propergols solides // ONERA Technical Report N 5/3173 EY. 1983.
6. **Cauty F.** Mesure par ultrasons de la vitesse de combustion d'un propergol solide à toutes

- temperatures // 5th Congrès Intern. de Pyrotechnie "Euro Pyro 93", Strasbourg, France, 6–11 June 1993.
7. **Fourest B. and Masson C.** Recherche et développement de propergols aérobies à fort exposant de pression // Proc. of the 21st Intern. Congress of ICT. Karlsruhe, Germany, 1990.
  8. **Dijkstra R., Korting P., and van den Berg R.** Ultrasonic regression rate measurement in solid fuel ramjets // AIAA Paper N 90-1963. 1990.
  9. **Louwers J., Gadiot G., Versluis M. et al.** Combustion of hydrazinium nitroformate based compositions // AIAA Paper N 98-3385. 1998.
  10. **Chiaverini M., Harting G., Lu Y. C. et al.** Fuel decomposition and boundary-layer combustion processes of hybrid rocket motors // AIAA Paper N 95-2686. 1995.
  11. **McQuade W., Dauch F., Moser M. D., and Frederick R. A.** Determination of the ultrasonic burning rate technique resolution // AIAA Paper N 98-3555. 1998.
  12. **DiSalvo R., Frederick R. A., and Moser M. D.** Experimental determination of solid propellant combustion response // AIAA Paper N 98-3553. 1998.
  13. **Murphy J. J., Martin A. O., and Krier H.** Precision techniques for measuring burning rates of solid propellants during pressure transients // AIAA Paper N 98-0560. 1998.
  14. **AEDC Test Highlights** // Published by Office of Public Affairs, Arnold Engineering Development Center, Arnold Air Force Base, Tenn., Fall, 1992.
  15. **Deepak D., Jeenu R., Sridharan P., and Padmanabhan M. S.** Determination of pressure dependence of burning rate in solid motors using ultrasonic technique // J. Propulsion and Power. 1998. V. 14, N 3, May–June.
  16. **Deepak D., Jeenu R., Sridharan P., and Padmanabhan M. S.** Determination of propellant burning rate law from specimen tests using ultrasonic technique // Propellants, Explosives, Rockets, and Guns: Proc. of the Second Intern. High Energy Materials Conference and Exhibit, IIT Madras, Chennai, India, 8–10 December, 1998. P. 483–486.
  17. **Mason W. P.** Multiple reflection ultrasonic delay lines // Physical Acoustics — Principles and Methods / W. P. Mason (Ed). Academic Press, 1964. V. 1. Pt A. P. 485–500.
  18. **Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing.** Technical Documentation, Panametrics, P395. 1995. P. 31–33.
  19. **Cauty F. and Démarais J. C.** Ultrasonic measurement of the uncured solid propellant burning rate // Proc. of the 21st Intern. Congress of ICT. Karlsruhe, Germany, 1990.
  20. **Cauty F.** Measurement of solid propellant response function at low frequency by means of ultrasonic method // Colloque CNES/ONERA/CNRS sur les écoulements propulsifs dans les systèmes de transport spatial, Bordeaux, France. ONERA, 11–15/9/1995.

*Поступила в редакцию 29/IX 1999 г.*

---